

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมกระแสป้อนและปรับปรุงตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุต
ชื่อนักศึกษา	นายพูนศรี วรรณการ
รหัสประจำตัว	44061057
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. ประภาพร ไพรสุวรรณ
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ร่วม	รศ.ดร. วิจิตร กิณเรศ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ออกแบบ และสร้างเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงที่มีการควบคุมกระแสป้อนและปรับปรุงตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุต ในส่วนด้านหน้าได้ใช้วงจรสวิตช์โหมคเอช-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ไอจีบีทีสองตัวที่เพิ่มเข้าไปในวงจรฟูลบริดจ์เรกติฟาย ซึ่งเป็นกระบวนการปรับปรุงรูปคลื่นกระแสทางอินพุตของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรง กระแสเชื่อมทางเอาต์พุตถูกควบคุมให้คงที่โดยใช้หลักการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยการตรวจจับกระแสป้อนของหม้อแปลงความถี่สูงมาเปรียบเทียบกับกระแสอ้างอิงผ่านตัวควบคุมแบบพีไอ มาตรฐานสัญญาณพีคบัลลวเี่ยมความถี่สวิตซ์ 50 kHz มาควบคุมการสวิตซ์ของมอสเฟสในวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ จากผลการจำลองและทดลองแสดงให้เห็นถึงความสามารถของระบบที่นำเสนอ ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

Thesis Title	A DC Electric Welder with Primary Current Control and Input Power Factor Improvement
Student	Mr. Poonsri Wannakran
Student ID.	44061057
Degree	Master of Engineering
Programme	Electrical Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Prapas Prisuiwanna
Thesis Co-Advisor	Assoc.Prof.Dr.Vijit Kinnares

ABSTRACT

This thesis presents the analysis design and construct of a dc electric welder with primary current control and input power factor improvement. The front end employs an AC-DC switched mode converter using two Insulated-gate-bipolar-transistors in a full-bridge converter in order to improve current waveform for input side of the dc electric welder. The output arc current is controlled at a constant level by using PI controller which primary current of a high frequency transformer is compared with reference current. Then, resultant PWM signals are used to control Power MOSFETs as switching devices in the full bridge inverter. Simulation and experimental results show the satisfied capability of the proposed system.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ประภาส ไพรสุวรรณ และ รศ.ดร.วิจิตร ถินเรศ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ประธานกรรมการสอบหัวข้อและโครงร่าง วิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิทยาเขตพระนครเหนือ ที่ให้ทุนสนับสนุนในการทำวิจัยนี้ ขอขอบคุณ พี่ๆ น้องๆ ในห้องปฏิบัติการทุกคน

สุดท้ายต้องขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณเนาวรัตน์ วรรณการ ที่ให้กำลังใจในการทำวิจัยนี้

สำหรับความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

พูนศรี วรรณการ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 วิธีการวิจัย.....	2
1.4 ขอบเขตวิทยานิพนธ์.....	3
1.5 โครงสร้างของวิทยานิพนธ์.....	3
1.6 ประโยชน์ที่ได้จากวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานเกี่ยวกับอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส กำลังไฟฟ้า และฮาร์มอนิกส์.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้นของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟส.....	5
2.2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน.....	5
2.2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายกระแส.....	6
2.3 การทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบมีการสวิตช์ 2 ระดับ.....	7
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานทางด้านกำลังไฟฟ้าและฮาร์มอนิกส์.....	9
2.4.1 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย กำลังไฟฟ้ารีแอกทีฟ และกำลังไฟฟ้าปรากฏ.....	9
2.4.1.1 การไหลของกำลังไฟฟ้า.....	9
2.4.1.2 ค่าเฉลี่ยและค่าอาร์เอ็มเอส.....	11
2.4.1.3 กำลังไฟฟ้าชั่วขณะ.....	11
2.4.1.4 กำลังไฟฟ้าเฉลี่ย.....	12
2.4.1.5 กำลังไฟฟ้าปรากฏ.....	13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.2	รูปคลื่นไซน์.....	14
2.4.2.1	กำลังไฟฟ้าชั่วขณะและกำลังไฟฟ้าเฉลี่ย.....	14
2.4.2.2	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	15
2.4.3	รูปคลื่นที่ไม่เป็นไซน์.....	16
2.4.3.1	การวิเคราะห์แบบฟูเรียร์.....	17
2.4.3.2	ฮาร์มอนิกส์ของกระแสในไลน์.....	20
2.4.3.3	ความผิดเพี้ยนรวมทั้งหมดของฮาร์มอนิกส์.....	22
2.4.3.4	ตัวประกอบกำลังไฟฟ้า.....	23
2.5	สรุป.....	25
บทที่ 3	ทฤษฎีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า และการวิเคราะห์การควบคุมกระแส.....	26
3.1	ทฤษฎีการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	26
3.2	การควบคุมกระแสโดยใช้เทคนิคพีดับบลิวเอ็มที่สร้างจากการปรับตัวของกระแส...28	
3.3	หลักการทํางานสวิตช์โหมดเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์หนึ่งเฟสร่วมกับเครื่อง เชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	30
3.4	การจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของสวิตช์โหมดเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีการ ป้อนกลับ.....	39
3.5	สรุป.....	43
บทที่ 4	การออกแบบและสร้าง.....	44
4.1	บทนำ.....	44
4.2	วงจรส่วนต่างๆ ในระบบควบคุมการปรับปรุงรูปคลื่นกระแส.....	46
4.2.1	วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	46
4.2.2	วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	47
4.2.3	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	47
4.2.4	วงจรควบคุมแบบพีไอที่ใช้ในวงจรสวิตช์โหมดเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์.....	48
4.2.5	วงจรคูณสัญญาณ.....	52

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.6	วงจรเปรียบเทียบแบบฮิสเตอร์รีซิสลูป.....	53
4.2.7	วงจรจับเกทไอจีบีที.....	55
4.2.8	วงจรป้องกันไอจีบีทีเสียหาย.....	56
4.3	วงจรส่วนต่างๆ ในระบบควบคุมกระแสเชื่อม.....	56
4.3.1	วงจรตรวจจับกระแส.....	56
4.3.2	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	57
4.3.3	วงจรควบคุมแบบพีไอที่ใช้ในการควบคุมกระแส.....	58
4.3.4	วงจรสร้างสัญญาณควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์.....	61
4.3.5	วงจรจับเกทมอสเฟต.....	62
4.3.6	วงจรป้องกันมอสเฟตเสียหาย.....	63
4.4	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำในวงจรสวิตช์โหมคคอนเวอร์เตอร์ทางด้านอินพุต.....	63
4.5	การออกแบบตัวเหนี่ยวนำทางด้านเอาต์พุต.....	66
4.6	การออกแบบหม้อแปลงความถี่สูง.....	68
4.7	การออกแบบชุดอินเวอร์เตอร์.....	74
4.8	การออกแบบชุดไดโอดเรกติฟายทางด้านอินพุต.....	75
4.9	การออกแบบชุดไดโอดเรกติฟายทางด้านเอาต์พุต.....	76
4.10	สรุป.....	76
บทที่ 5	ผลการทดลอง.....	77
5.1	การทดลองการทำงานของวงจรสวิตช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ภายใต้การต่อ โหลดความต้านทาน.....	77
5.2	การเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลอง.....	83
5.3	การทดลองและตรวจสอบการทำงานของสวิตช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ ปรับปรุงรูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุตขณะเชื่อมอาร์คขึ้นงาน.....	84
5.4	สรุป.....	90

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 6 บทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	91
6.1 วิจัยผลการทดลอง.....	91
6.2 สรุป.....	92
6.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป.....	92
เอกสารอ้างอิง.....	93
ภาคผนวก.....	94
ภาคผนวก ก. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	95
ภาคผนวก ข. ภาพโครงงานโดยรวมของงานวิจัย และภาพต้นแบบงานวิจัย.....	100
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	102
ประวัติผู้เขียน.....	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ของสมการฟูเรียร์เมื่อรูปคลื่นสัญญาณสมมาตรกัน.....	19
4.1 ตารางเทียบขนาดลวดสายไฟฟ้า.....	67
4.2 แสดงค่าด้านต่างๆ ของแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์(EE-65)	71
5.1 แสดงการทดสอบหาค่าดัชนีคุณภาพทางไฟฟ้าภายใต้โหลดตัวต้านทานก่อนปรับปรุง ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต.....	80
5.2 แสดงการทดสอบหาค่าดัชนีคุณภาพทางไฟฟ้าภายใต้โหลดตัวต้านทานก่อนปรับปรุง ตัวประกอบกำลังไฟฟ้าทางด้านอินพุต.....	81
5.3 ผลการทดลองเมื่อยังไม่ปรับปรุงรูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุตของเครื่องเชื่อม.....	89
5.4 ผลการทดลองเมื่อปรับปรุงรูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุตของเครื่องเชื่อม.....	89

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน(VSI).....	6
2.2 อินเวอร์เตอร์แบบแหล่งจ่ายแรงดัน(CSI).....	6
2.3 โหมดการทำงานของอินเวอร์เตอร์ 1 เฟสแบบ 2 ระดับ.....	8
2.4 การไหลของกำลังไฟฟ้าในทิศทางเดียวและสองทิศทาง.....	10
2.5 วงจรไฟฟ้าในเชิงเวลา เชิงเฟสเซอร์ และรูปคลื่นแรงดัน กระแส และกำลังที่เกิดขึ้น.....	12
2.6 วงจรไฟฟ้าแบบเชิงเส้น 1 พอร์ท รูปคลื่นกระแสและแรงดันที่ต่างเฟสกัน.....	16
2.7 สามเหลี่ยมตรีโกณที่ใช้พิจารณาสมการ(2.30).....	18
2.8 แถบสเปคตรัมความถี่ในฟังก์ชันของเวลา.....	20
3.1 วงจรสมมูลและ เฟสเซอร์ไดอะแกรมของการส่งถ่ายกำลังไฟฟ้า.....	27
3.2 วงจรสร้างสัญญาณพีคดับลิวเอ็มด้วยการปรับตัวของกระแส.....	29
3.3 บล็อกไดอะแกรมของชุดสวิทช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และชุดอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	30
3.4 สัญญาณพัลส์ควบคุมสวิทช์ไอจีบีที (S_1 และ S_2) ที่ได้จากตัวเปรียบเทียบ กระแสแบบฮิสเตอร์รีชีส.....	31
3.5 สถานะการทำงานของสวิทช์ไอจีบีทีที่ใช้ปรับปรุงรูปคลื่นกระแสทางด้านอินพุต ของเครื่องเชื่อมทั้ง 4 สถานะ.....	33
3.6 บล็อกไดอะแกรมควบคุมทั่วไปของสวิทช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีการ ป้อนกลับ.....	39
3.7 บล็อกไดอะแกรมควบคุมทั่วไปของสวิทช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีการ ป้อนกลับ.....	41
3.8 ตัวควบคุมแบบพีไอ(PI).....	41
4.1 บล็อกไดอะแกรมของชุดสวิทช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์และชุดอินเวอร์เตอร์ ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	44
4.2 ระบบควบคุมแบบลูปปิดเพื่อควบคุมการสวิทช์ของไอจีบีทีในการปรับปรุง รูปคลื่นกระแส.....	45
4.3 ระบบควบคุมแบบลูปปิดเพื่อควบคุมการสวิทช์ของมอสเฟตในวงจร ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	46
4.4 วงจรตรวจจับสัญญาณกระแส.....	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 วงจรตรวจจับสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง.....	47
4.6 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ.....	48
4.7 วงจรควบคุมแบบพีไอที่ใช้ในวงจรสวิตช์โหมดเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์.....	48
4.8 เส้นทางเดินรากของฟังก์ชันถ่ายโอนสวิตช์โหมดเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ.....	49
4.9 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบยูนิตสเตป(Unit Step) ที่ค่า $k = 25$	50
4.10 วงจรคูณสัญญาณ.....	52
4.11 วงจรอีสเตอริ์ชีสลับ.....	53
4.12 วงจรจับเกทไอจีบีที.....	55
4.13 วงจรป้องกันไอจีบีทีเสียหาย.....	56
4.14 วงจรตรวจจับกระแสเชื่อม.....	57
4.15 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณกระแสเชื่อม.....	57
4.16 วงจรควบคุมกระแสเชื่อมแบบพีไอ.....	58
4.17 บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสเชื่อมแบบพีไอ.....	58
4.18 เส้นทางเดินรากของฟังก์ชันถ่ายโอนสวิตช์โหมดเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ที่มีการควบคุมแบบพีไอ.....	59
4.19 ผลการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตแบบยูนิตสเตป(Unit Step) ที่ค่า $k = 1$	59
4.20 วงจรผลิตสัญญาณควบคุมชุดอินเวอร์เตอร์.....	61
4.21 วงจรจับเกทมอสเฟต.....	62
4.22 วงจรป้องกันมอสเฟตเสียหาย.....	63
4.23 แผนภาพเฟสเซอร์ในกรณีที่ $V_s = V_{conv1}$ และ $PF = \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$	63
4.24 รูปคลื่นกระแสที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำด้านเอาต์พุต.....	66
4.25 ค่าต่างๆ ที่ใช้ในการคำนวณหาความเหนี่ยวนำเมื่อพันตัวนำรอบแกนอากาศ.....	68
4.26 การพันตัวนำบนแกนเฟอร์ไรต์ของหม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง.....	68
4.27 แสดงด้านต่างๆ ของแกนแม่เหล็กเฟอร์ไรต์(EE-65) ที่ใช้ออกแบบ.....	70
4.28 วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์.....	74
4.29 วงจรฟูลบริดจ์เรกติไฟเออร์ทางด้านอินพุต.....	75
4.30 วงจรฟูลบริดจ์เรกติไฟเออร์ทางด้านเอาต์พุต.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1 วงจรกำลังสวิตช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ภายใต้การต่อโหลดความต้านทาน.....	77
5.2 วงจรกำลังสวิตช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ภายใต้การต่อโหลดเครื่องเชื่อมไฟฟ้า กระแสตรงแบบอินเวอร์เตอร์ความถี่สูง.....	78
5.3 แรงดันและกระแสทางอินพุต สเกลแรงดัน 100 V/div สเกลกระแส 1 A/div.....	78
5.4 รูปสัญญาณแรงดันตกคร่อมสวิตช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์ รูปสัญญาณกระแสทางด้านอินพุต และรูปสัญญาณแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำ.....	79
5.5 สเปกตรัมของกระแสทางด้านอินพุตหลังปรับปรุงภายใต้โหลดความต้านทาน.....	78
5.6 ค่าตัวประกอบกำลังและค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ภายใต้โหลดความต้านทาน.....	79
5.7 สัญญาณแรงดันดีซีเชื่อมโยงเมื่อโหลดเป็นตัวต้านทานไม่มีการเปลี่ยนแปลง.....	80
5.8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\% \text{THDi} = f(P_{\text{out}})$	82
5.9 ความสัมพันธ์ระหว่าง Power Factor = $f(P_{\text{out}})$	82
5.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง Efficiency(%) = $f(P_{\text{out}})$	82
5.11 ไดอะแกรมการจำลองการทำงานของระบบ.....	83
5.12 ผลการจำลองและการทดลองตรวจจับกระแสทางด้านเอาต์พุต.....	83
5.13 ผลการจำลองและการทดลองตรวจจับแรงดันคอนเวอร์เตอร์.....	84
5.14 ผลการจำลองและการทดลองตรวจจับแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของ สวิตช์โหมคเอซี-ดีซีคอนเวอร์เตอร์.....	84
5.15 ผลการทดลองเปรียบเทียบลักษณะทางด้านแรงดันและกระแสทางด้านอินพุตของ เครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงในขณะที่ยังไม่เชื่อมอาร์คชิ้นงานที่แรงดันไฟตรง เอาต์พุต 60 โวลต์.....	85
5.16 ผลการทดลองการเปรียบเทียบสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกในขณะที่ยังไม่เชื่อม อาร์คชิ้นงานที่แรงดันไฟตรงเอาต์พุต 60 โวลต์.....	85
5.17 ผลการทดลองการเปรียบเทียบลักษณะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่เชื่อม อาร์คชิ้นงานที่แรงดันไฟตรงเอาต์พุต 60 โวลต์.....	86
5.18 ผลการทดลองการเปรียบเทียบลักษณะทางด้านอินพุตของเครื่องเชื่อมไฟฟ้า กระแสตรงในขณะที่เชื่อมอาร์คชิ้นงานที่กระแสเอาต์พุต 30 แอมป์.....	86
5.19 ผลการทดลองการเปรียบเทียบสเปกตรัมของกระแสฮาร์โมนิกในขณะที่เชื่อมอาร์ค. ชิ้นงานที่กระแสเอาต์พุต 30 แอมป์.....	87

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.20 ผลการทดลองการเปรียบเทียบลักษณะตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในขณะที่เชื่อมอาร์ค ชิ้นงานที่กระแสอาร์ค 30 แอมป์.....	87
5.21 กระแสอาร์คขณะเชื่อมอาร์คชิ้นงานที่ 30 แอมป์ สเกลกระแส 10 A /Div.....	88
5.22 สัญญาณแรงดันคิซีเชื่อมโยงที่ป้อนให้ชุดอินเวอร์เตอร์.....	88
5.23 แสดงเครื่องเชื่อมไฟฟ้ากระแสตรงคันแบบที่มีการควบคุมกระแสป้อนภูมิและ ปรับปรุง ตัวประกอบกำลังทางด้านอินพุต.....	89